

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Einleitung</b> (W. Boeck)	
<b>II</b>	<b>Beanspruchungen von Isolieranordnungen</b> (K. Möller)	
1	Aufgaben von Isolierungen . . . . .	9
1.1	Elektrische Aufgaben . . . . .	9
1.2	Mechanische Aufgaben . . . . .	9
1.3	Thermische Aufgaben . . . . .	10
1.4	Chemische Beständigkeit und Umweltverträglichkeit . . . . .	10
1.5	Beispiele typischer Isolieranordnungen . . . . .	10
2	Elektrische Beanspruchungen von Isolieranordnungen . . . . .	16
2.1	Stationäre Spannungsbeanspruchungen . . . . .	16
2.1.1	Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz . . . . .	16
2.1.1.1	Erdschluß . . . . .	16
2.1.1.2	Lastabwurf . . . . .	18
2.1.1.3	Ferranti-Effekt . . . . .	19
2.1.2	Zeitweilige Spannungserhöhungen mit einer von der Betriebsfrequenz abweichenden Frequenz . . . . .	19
2.1.2.1	Resonanzen . . . . .	20
2.1.2.2	Kippschwingungen . . . . .	21
2.2	Schaltspannungen . . . . .	21
2.2.1	Bezugsgröße für die Amplitude von Schaltspannungen . . . . .	22
2.2.2	Einschalten langer unbelasteter Leitungen . . . . .	22
2.2.3	Ausschalten kleiner induktiver Ströme . . . . .	24
2.2.4	Transiente Spannungen bei Erdschlüssen . . . . .	26
2.2.5	Kennzeichnung von Schaltspannungen für Prüfzwecke . . . . .	28
2.3	Blitzüberspannungen . . . . .	28
2.3.1	Entstehung und Kenndaten von Blitzentladungen . . . . .	28
2.3.2	Entstehung von Blitzüberspannungen . . . . .	28
2.3.2.1	Direkter Blitzeinschlag in ein Leiterseil . . . . .	28
2.3.2.2	Rückwärtiger Überschlag . . . . .	28
2.3.2.3	Indirekte Blitzeinschläge . . . . .	29
2.3.3	Beurteilung und Kennzeichnung von Blitzüberspannungen . . . . .	29

VIII	Inhaltsverzeichnis	
3	Innere elektrische Beanspruchung von Isolieranordnungen	30
3.1	Homogene Isolierungen . . . . .	30
3.2	Kondensatorkette . . . . .	31
3.2.1	Isolatorkette mit kapazitiver Verkettung . . . . .	31
3.3	Beurteilung und Überleitung . . . . .	32
<b>III</b>	<b>Bestimmung elektrostatischer Felder</b>	
(K. Möller)		
4	Grundgesetze und Eigenschaften des elektrostatischen Feldes	35
4.1	Grundbegriffe . . . . .	35
4.2	Maxwellsche Gleichungen und Grundgesetze des elektro- statischen Feldes . . . . .	36
4.3	Potentialgleichungen des elektrischen Feldes . . . . .	37
4.4	Feldgrößen an Grenzflächen . . . . .	37
5	Berechnung elektrostatischer Felder . . . . .	39
5.1	Geschlossene Berechnung einfacher Felder . . . . .	39
5.1.1	Lösung der Laplaceschen Differentialgleichung . . . . .	39
5.1.2	Ladungsverfahren . . . . .	41
5.1.2.1	Anwendung der Grundgesetze . . . . .	41
5.1.2.2	Überlagerungsverfahren . . . . .	42
5.1.3	Konforme Abbildung . . . . .	45
5.1.3.1	Prinzip der konformen Abbildung . . . . .	45
5.1.3.2	Berechnung der elektrischen Feldstärke . . . . .	46
5.1.3.3	Beispiele . . . . .	47
5.1.4	Einfache Raumladungsfelder . . . . .	51
5.1.4.1	Raumladungen und ihre Entstehung . . . . .	51
5.1.4.2	Beispiele . . . . .	51
5.1.5	Dielektrikum mit zylindrischer Schichtung . . . . .	53
5.2	Numerische Berechnung elektrostatischer Felder . . . . .	54
5.2.1	Differenzenverfahren . . . . .	55
5.2.1.1	Grundlagen . . . . .	55
5.2.1.2	Rechengang beim Differenzenverfahren . . . . .	57
5.2.1.3	Beispiele . . . . .	57
5.2.1.4	Netzverfeinerung und Kontrolle . . . . .	58
5.2.1.5	Dreidimensionale Felder . . . . .	58
5.2.2	Finite-Elemente-Methode . . . . .	60
5.2.2.1	Grundlagen . . . . .	60
5.2.2.2	Dreidimensionale Felder . . . . .	62
5.2.3	Ersatzladungsverfahren . . . . .	62
5.2.3.1	Grundlagen . . . . .	62
5.2.3.2	Rechengang beim Ersatzladungsverfahren . . . . .	63
5.2.3.3	Ladungsformen . . . . .	63
5.2.3.4	Berechnung geschichteter Dielektrika . . . . .	65
5.2.3.5	Elektroden auf freiem Potential . . . . .	66
5.2.4	Monte-Carlo-Methode . . . . .	66
5.2.4.1	Grundlagen . . . . .	67

5.2.4.2	Berechnung von Randfeldstärken . . . . .	67
5.2.4.3	Berechnung geschichteter Dielektrika . . . . .	67
5.2.5	Vergleich der numerischen Feldberechnungsverfahren . . . . .	67
5.2.5.1	Prinzipielle Fehlerquellen der numerischen Verfahren . . . . .	67
5.2.5.2	Adoptionsaufwand, Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf . . . . .	68
5.3	Optimierung von Elektrodenanordnungen . . . . .	69
5.3.1	Geschlossene Optimierung . . . . .	69
5.3.1.1	Zylinderkondensator . . . . .	69
5.3.1.2	Kugelkondensator . . . . .	70
5.3.2	Numerische Optimierung . . . . .	70
5.3.2.1	Verschiebung von Konturpunkten . . . . .	70
5.3.2.2	Veränderung des Ersatzladungssystems . . . . .	70
5.4	Abschätzung von Maximalfeldstärken . . . . .	72
5.4.1	Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger . . . . .	72
5.4.2	Grundanordnungen . . . . .	73
5.4.3	Graphische Bestimmung elektrostatischer Felder (Lehmann-Verfahren) . . . . .	73
6	Messung elektrostatischer Felder . . . . .	75
6.1	Direkte Messung . . . . .	75
6.1.1	Kapazitätssonde . . . . .	75
6.1.2	Kompensationsverfahren (Brückenverfahren) . . . . .	75
6.2	Analoge Abbildung elektrostatischer Felder . . . . .	76
6.2.1	Abbildung ebener Felder auf leitfähigem Papier . . . . .	76
6.2.2	Elektrolytischer Trog . . . . .	76
6.2.3	Widerstandsnetzwerke . . . . .	77

#### **IV Elektrische Festigkeit** (W. Boeck, Kap. 7; M. Beyer, Kap. 8)

7	Gasförmige Isolierstoffe . . . . .	81
7.1	Grundaufbau und Grundeigenschaften von Gasen . . . . .	81
7.1.1	Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle . . . . .	81
7.1.2	Allgemeine Gasgleichung . . . . .	82
7.1.3	Mittlere freie Weglänge . . . . .	83
7.2	Ladungsträgerbewegung . . . . .	86
7.2.1	Ladungsträgerbewegung im Vakuum . . . . .	86
7.2.2	Ladungsträgerbewegung im Gas . . . . .	86
7.3	Ionisations-, Anregungs- und Anlagerungsprozesse . . . . .	89
7.3.1	Prozeßenergien . . . . .	89
7.3.2	Raumionisationsprozesse . . . . .	91
7.3.2.1	Thermische Ionisation . . . . .	91
7.3.2.2	Photoionisation . . . . .	92
7.3.2.3	Stoßionisation . . . . .	93
7.3.3	Oberflächenemissionsprozesse . . . . .	95
7.3.3.1	Feldemission . . . . .	95
7.3.3.2	Thermoemission . . . . .	95
7.3.3.3	Photoemission . . . . .	96

## X Inhaltsverzeichnis

7.3.3.4	Sekundärelektronenemission ( $\gamma$ -Prozeß) . . . . .	96
7.3.4	Rekombination der Ladungsträger und Ladungsträgergleichgewicht . . . . .	96
7.3.5	Elektronenanlagerung . . . . .	97
7.4	Entladungsaufbau . . . . .	98
7.4.1	Strom-Spannungs-Kennlinie einer Entladungsstrecke . . . . .	98
7.4.2	Lawinenbildung und effektiver Ionisationskoeffizient . . . . .	99
7.5	Durchschlagmechanismen in homogenen und quasihomogenen Anordnungen . . . . .	100
7.5.1	Streamerdurchschlag . . . . .	100
7.5.2	Generationendurchschlag . . . . .	103
7.5.3	Paschenabhängigkeit und Ähnlichkeitsgesetz des Gasdurchschlags . . . . .	105
7.5.4	Durchschlag von Mischgasen . . . . .	109
7.5.5	Einfluß der Elektrodenrauhigkeit auf den Durchschlag . . . . .	111
7.6	Durchschlag im inhomogenen Feld . . . . .	114
7.6.1	Polaritätseinfluß durch Raumladungsbildung . . . . .	114
7.6.1.1	Positive Spitze-Platte . . . . .	114
7.6.1.2	Negative Spitze-Platte . . . . .	114
7.6.2	Streamerentladung . . . . .	115
7.6.2.1	Positive Streamerentladung . . . . .	116
7.6.2.2	Negative Streamerentladung . . . . .	116
7.6.3	Leaderentladung . . . . .	117
7.6.4	Streamerdurchschlag technischer Anordnungen . . . . .	118
7.6.5	Leaderdurchschlag technischer Anordnungen . . . . .	118
7.6.5.1	Räumlich-zeitlicher Entladungsaufbau . . . . .	118
7.6.5.2	Rechenverfahren für den Leaderdurchschlag . . . . .	120
7.7	Zündverzug und Durchschlagsverhalten bei transienter Spannungsbeanspruchung . . . . .	122
7.7.1	Statistische Streuzeit . . . . .	123
7.7.1.1	Anfangselektronenrate . . . . .	123
7.7.1.2	Lawinenbildung . . . . .	124
7.7.2	Streameraufbauzeit . . . . .	126
7.7.3	Funkenaufbauzeit . . . . .	128
7.7.4	Spannungs-Zeit-Kennlinie . . . . .	130
7.8	Blitzentladung . . . . .	132
7.8.1	Meteorologischer Aufbau der Gewitterwolke . . . . .	132
7.8.2	Elektrizitätsentwicklung im Gewitter . . . . .	135
7.8.3	Vorgang der Blitzentladung . . . . .	135
7.8.3.1	Abwärtsblitz . . . . .	135
7.8.3.2	Aufwärtsblitz . . . . .	136
7.8.4	Gefährdungsparameter von Blitzen . . . . .	136
7.9	Überschlag an Isolierstoffoberflächen . . . . .	138
7.9.1	Gleitentladung an Isolierstoffoberflächen . . . . .	139
7.9.2	Fremdschichtüberschlag längs Isolierstoffoberflächen . . . . .	141
7.10	Vakuumdurchschlag . . . . .	143
8	Flüssige und feste Isolierstoffe . . . . .	145
8.1	Isolierflüssigkeiten . . . . .	145

8.1.1	Physiko-chemische Eigenschaften . . . . .	145
8.1.2	Grundlagen der Leitungsmechanismen in dielektrischen Flüssigkeiten . . . . .	148
8.1.2.1	Gleichstromleitfähigkeit . . . . .	148
8.1.2.2	Dielektrischer Verlustfaktor und Dielektrizitätszahl . . . . .	149
8.1.2.3	Begriffe, Definitionen und Ersatzschaltbilder . . . . .	149
8.1.2.4	Leitungs- und Polarisationsmechanismen . . . . .	151
8.1.3	Durchschlagmechanismen in Flüssigkeiten . . . . .	154
8.1.3.1	Verschleierte Gasentladung . . . . .	154
8.1.3.2	Faserbrückendurchschlag . . . . .	155
8.1.3.3	Messung der Durchschlagsspannung von Isolierflüssigkeiten .	155
8.1.3.4	Einfluß von Temperatur, Gas- und Wassergehalt auf die Durchschlagfestigkeit . . . . .	157
8.1.3.5	Elektrische Festigkeit im Bereich stationärer Teilentladungen	158
8.1.4	Arten von Isolierflüssigkeiten . . . . .	160
8.1.4.1	Isolieröle auf Mineralölbasis . . . . .	160
8.1.4.2	Synthetische Isolierflüssigkeiten . . . . .	162
8.1.5	Aufbereitung von Isolierflüssigkeiten . . . . .	166
8.2	Feste Isolierstoffe . . . . .	167
8.2.1	Leitungs- und Verlustmechanismen . . . . .	167
8.2.1.1	Gleichstromleitung . . . . .	167
8.2.1.2	Wechselspannungsverluste . . . . .	173
8.2.2	Durchschlagprozesse . . . . .	178
8.2.2.1	Elektrischer Durchschlag . . . . .	180
8.2.2.2	Wärmedurchschlag . . . . .	183
8.2.2.3	Teilentladungen, Erosionsdurchschlag, elektrische Alterung .	186
8.2.3	Arten fester Isolierstoffe . . . . .	187
8.2.3.1	Keramische Isolierstoffe . . . . .	187
8.2.3.2	Gläser . . . . .	189
8.2.3.3	Glimmer . . . . .	189
8.2.3.4	Hochpolymere Isolierstoffe . . . . .	190
8.2.3.5	Thermoplaste . . . . .	191
8.2.3.6	Elastomere . . . . .	198
8.2.3.7	Duroplaste . . . . .	200
8.3	Mischdielektrika . . . . .	215
8.3.1	Imprägnierte Foliendielektrika . . . . .	215
8.3.2	Papier-Öl-Dielektrikum . . . . .	217
8.3.2.1	Papier . . . . .	217
8.3.2.2	Imprägniertes Isolierpapier . . . . .	221
8.3.3	Imprägnierte Papier/Kunststoff-Dielektrika . . . . .	222
8.3.4	Hartpapiere . . . . .	224
8.3.5	Transformerboard . . . . .	224
<b>V</b>	<b>Erzeugung und Messung hoher Prüfspannungen</b>	
	(W. Zaengl)	
9	Spannungs- und Stromquellen . . . . .	230
9.1	Erzeugung hoher Wechselspannungen . . . . .	230
9.1.1	Übersicht und Kenngrößen . . . . .	230

## XII Inhaltsverzeichnis

9.1.2	Prüftransformatoren . . . . .	230
9.1.2.1	Hinweise zur Dimensionierung . . . . .	230
9.1.2.2	Schaltungen und Bauformen . . . . .	232
9.1.2.3	Besonderheiten im Betriebsverhalten . . . . .	238
9.1.3	Resonanzschaltungen . . . . .	239
9.2	Erzeugung hoher Gleichspannungen . . . . .	241
9.2.1	Übersicht und Kenngrößen . . . . .	241
9.2.2	Elektrostatische Generatoren . . . . .	242
9.2.2.1	Bandgeneratoren . . . . .	242
9.2.2.2	Trommelgeneratoren . . . . .	244
9.2.2.3	Regelung elektrostatischer Generatoren . . . . .	245
9.2.3	Gleichrichtung von Wechselspannungen . . . . .	246
9.2.3.1	Einweggleichrichtung mit Spannungsglättung . . . . .	246
9.2.3.2	Die Greinacher-Kaskadenschaltung . . . . .	248
9.2.3.3	Sonstige Kaskadenschaltungen . . . . .	251
9.2.3.4	Gleichrichter und Kondensatoren . . . . .	252
9.3	Erzeugung von Stoßspannungen und Stoßströmen . . . . .	254
9.3.1	Übersicht und Kenngrößen . . . . .	254
9.3.1.1	Stoßspannungen . . . . .	254
9.3.1.2	Stoßströme . . . . .	256
9.3.2	Stoßspannungsgeneratoren . . . . .	257
9.3.2.1	Einstufige Stoßspannungsschaltungen . . . . .	257
9.3.2.2	Berechnung und Dimensionierung . . . . .	258
9.3.2.3	Vervielfachungsschaltungen . . . . .	261
9.3.2.4	Gesteuerte Auslösung und Abschneidung von Stoßspannungen	264
9.3.2.5	Sonstige Stoß- bzw. Impulsspannungsschaltungen . . . . .	269
9.3.3	Stoßstromgeneratoren . . . . .	273
9.3.3.1	Generatoren für exponentielle Stoßströme . . . . .	273
9.3.3.2	Rechteck- oder Langzeit-Stoßstromgenerator . . . . .	276
10	Hochspannungsmeßtechnik . . . . .	280
10.1	Meßfunkenstrecken . . . . .	280
10.1.1	Die Kugelfunkenstrecke (KF) . . . . .	280
10.1.2	Sonstige Funkenstrecken mit homogenem oder quasihomogenem Feldverlauf . . . . .	287
10.1.3	Die Stabfunkenstrecke . . . . .	288
10.2	Spannungs- und Feldstärkemessung nach dem Influenzprinzip	289
10.2.1	Das Meßprinzip . . . . .	289
10.2.2	Rotorvoltmeter, Feldmühlen . . . . .	290
10.2.3	Schwingvoltmeter . . . . .	292
10.2.4	Kapazitätssonde zur Feldstärke- und Spannungsmessung . . . . .	292
10.3	Elektrostatische Voltmeter . . . . .	293
10.4	Messung von Gleichspannungen sowie von niederfrequenten Wechselspannungen mit hochohmigen Widerständen . . . . .	295
10.5	Messung der Scheitelwerte von Wechsel- und Stoßspannungen	296
10.5.1	Scheitelwertmessung von insbesondere netzfrequenten Wechselspannungen . . . . .	296
10.5.1.1	Schaltung von Chubb und Fortescue . . . . .	297
10.5.1.2	Spannungsteilung und Diodengleichrichtung . . . . .	298

10.5.1.3 Verstärkerschaltungen . . . . .	299
10.5.2 Messung des Scheitelwertes von Stoßspannungen . . . . .	301
10.5.2.1 Stoßspannungsoszillographen . . . . .	301
10.5.2.2 Analog-Digital-Converter (A/D-Wandler; ADC) . . . . .	302
10.5.2.3 Stoßspannungsvoltmeter . . . . .	303
10.6 Spannungsteiler für die Messung hoher Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen . . . . .	304
10.6.1 Beispiele für Hochspannungsteiler . . . . .	305
10.6.2 Die frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften . . . . .	306
10.6.3 Theorie der Spannungsteiler . . . . .	309
10.6.3.1 Ohmsche Spannungsteiler . . . . .	309
10.6.3.2 Kapazitive Spannungsteiler . . . . .	313
10.6.3.3 Der Spannungsteiler im Meßkreis . . . . .	315
10.7 Niederohmige Meßwiderstände: Impulsstrommessung . . . . .	317
10.7.1 Das Shunt-Problem . . . . .	317
10.7.2 Der koaxiale Meßwiderstand (Koaxial-Shunt; Röhren-Shunt) . . . . .	318
10.7.3 Bemerkungen zur Schirmwirkung von Koaxialkabeln . . . . .	321
10.8 Messung von Teilentladungen (TE) . . . . .	322
10.8.1 Allgemeine Problemstellung . . . . .	323
10.8.2 TE-Ströme . . . . .	323
10.8.3 Der TE-Prüfkreis . . . . .	325
10.8.4 TE-Meßverfahren . . . . .	326
10.8.4.1 Direkt integrierende Brücke . . . . .	328
10.8.4.2 Quasi-Integration der TE-Impulsströme . . . . .	329
10.8.4.3 Störspannungsmeßgeräte (RIV-Meter) . . . . .	341
10.8.5 Maßnahmen zur Störunterdrückung . . . . .	343
10.8.5.1 Brückenschaltung nach Schering . . . . .	343
10.8.5.2 Impulsdiskriminatorsystem . . . . .	345
10.8.5.3 Sonstige Schaltungsmaßnahmen . . . . .	345
Literaturverzeichnis . . . . .	346
Sachverzeichnis . . . . .	357